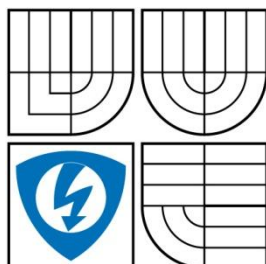


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# PLANÁRNÍ FILTRY S PORUŠENOU ZEMÍ

DEFECTED GROUND PLANAR FILTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

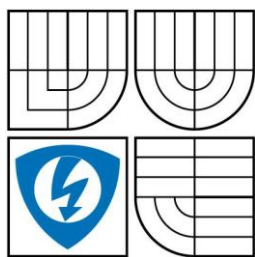
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN TOMÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Martin Tomíček  
**Ročník:** 3

**ID:** 74896  
**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

### Planární filtry s porušenou zemí

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základními typy planárních filtrů a s jejich modelováním v programu ANSOFT Designer. Do zemní desky filtru postupně vyleptejte různé tvarované poruchové štěrby a pozorujte jejich vliv na přenosové vlastnosti filtru.

Vyberte vhodný model dolní propusti a poruchovými prvky se pokuste dosáhnout co možná nejvyšší strmosti přenosové charakteristiky a co možná nejnižšího přenosu v zádržném pásmu. Vytvořte jak konvenční propust tak propust s porušenou zemí, proměřte jejich vlastnosti a výsledky porovnejte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HONG, J.-S., LANCASTER, M. J. Microstrip filters for RF / microwave applications. New York: John Wiley and Sons. 2001.

[2] AHN, D., PARK, J.S., KIM, C.S., KIM, J., QIAN, Y., ITOH, T. A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001, vol. 49, no. 1, p. 86-93.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# **Abstrakt**

Bakalářská práce popisuje mikropáskovou planární dolní propust s narušenou zemí. Práce se zabývá návrhem a simulací propusti v programu Ansoft Designer, srovnáním výsledků s realizovanou dolní propustí a zhodnocením jejich parametrů.

# **Klíčová slova**

Planární filtr, dolní propust, struktura s narušenou zemí, mikropáskové vedení, Ansoft Designer.

# **Abstract**

In the bachelor's thesis, the microstrip low-pass filter with the defected ground is described. The project deals with the design and the simulation of the filter in Ansoft Designer, confrontation of results between simulation and realized low-pass filter and the discussion of obtained results.

# **Keywords**

Planar filter, low-pass filter, defected ground structure, microstrip transmission line, Ansoft Designer.

TOMÍČEK, M. *Planární filtry s porušenou zemí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 30 s., 1 příl. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Planární filtry s porušenou zemí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod .....	6
1 Planární filtry s porušenou zemí.....	7
2 Charakteristiky struktur s narušenou zemí .....	8
3 Modelování v programu ANSOFT Designer .....	13
4 Srovnání filtru s narušenou zemí s konvenčním filtrem.....	18
5 Návrh dolní propusti.....	19
6 Závěr.....	26
Literatura .....	27
Seznam symbolů.....	28
Seznam obrázků.....	28
Seznam tabulek.....	29
Seznam příloh.....	30
Obsah DVD .....	30

# Úvod

V zařízeních pro rádiovou komunikaci se používají stále menší vysokofrekvenční komponenty, jakými jsou například antény, filtry a další součásti. Miniaturizací se snažíme dosáhnout stejných nebo lepších parametrů komunikačního zařízení využitím zmenšených komponentů.

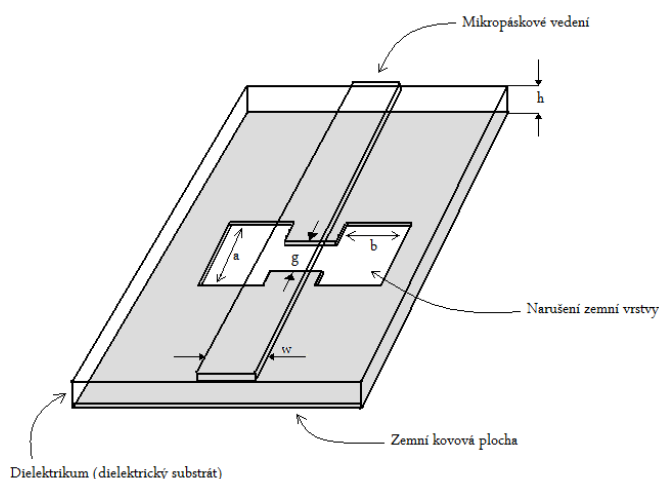
V této práci se zabývám možnostmi realizace miniaturizovaných planárních filtrů, založených na vhodném narušení souvislé zemní vrstvy.

Obsahově je práce rozdělena na pět částí. V první části je shrnuta teorie planárních filtrů s narušenou zemí. V části druhé zkoumáme v programu ANSOFT Designer vliv geometrie filtru na jeho kmitočtovou charakteristiku. V třetí části je uveden jeden konkrétní příklad jednoduché dolní propusti s narušenou zemí. V další části pak ilustrujeme na názorné ukázce, jak lze vhodným porušením zemní plochy dosáhnout menších rozměrů filtru ve srovnání s klasickými filtry s nenarušenou zemí. V poslední části je samotný návrh a realizace konkrétní dolní propusti.

# 1 Planární filtry s porušenou zemí

Jednou z možných modifikací klasických planárních filtrů je narušení souvislé zemní kovové plochy substrátu [1]. Vyleptáním poruchy v zemní rovině změníme tok proudů po povrchu této roviny, čímž ovlivníme průběh přenosových charakteristik mikropáskových struktur na lící straně substrátu.

Porucha (štěrbina) v zemní rovině obvykle sestává z úzkých a širokých segmentů, které zvyšují efektivní kapacitu a efektivní indukčnost vedení na lící straně substrátu (obr. 1). Vlastnosti celé struktury lze tudíž popsat ekvivalentním obvodem z indukčností a kapacit [1].



**Obr. 1** Mikropáskové vedení s narušenou zemí.

V rámci tohoto projektu se narušením zemní plochy pokusíme realizovat dolní propust. Podle [1] by měl realizovaný filtr:

1. být velmi jednoduchý;
2. mít nepropustné pásmo mnohem širší a hlubší ve srovnání s konvenčními dolními propustmi;
3. mít velmi malé průchozí ztráty.

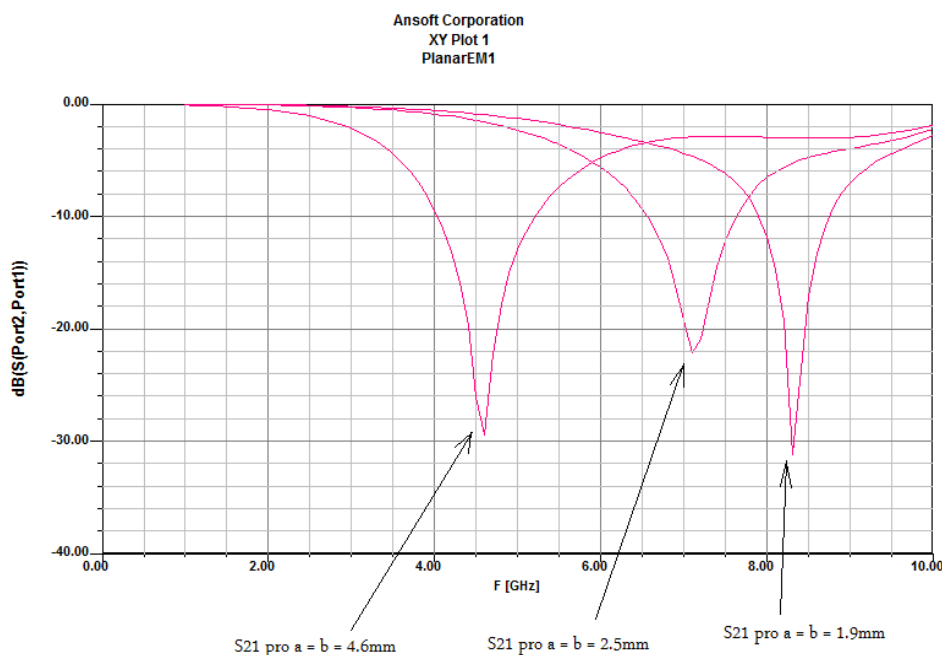
Navíc lze vytvořit filtr, jehož prvky vykazují extrémně malé hodnoty parametrů [1].



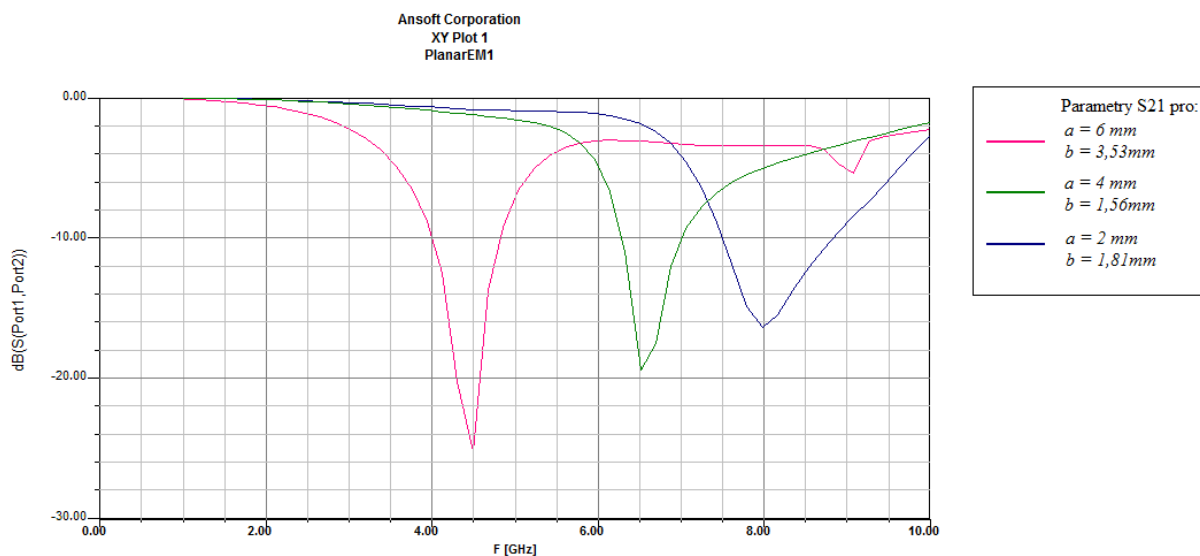
## 2 Charakteristiky struktur s narušenou zemí

Abychom mohli zkoumat frekvenční charakteristiky struktury z obr. 1, vytvoříme její numerický model v programu ANSOFT Designer. Šířka mikropásku je zvolena tak, aby odpovídala charakteristické impedanci  $50 \Omega$ . Substrát má tloušťku  $1,57 \text{ mm}$  a permitivitu  $\epsilon_r = 10$ .

Nejprve se zaměříme na vliv rozměrů širokých štěrbin. Šířku užší nastavíme při tomto zkoumání na fixní hodnotu  $g = 0,2 \text{ mm}$ . Šířku širší štěrbin  $a$  a délku širší štěrbin  $b$  měníme. V první části měníme šířky  $a$  a  $b$  shodně tj.  $a = b$ . Výsledky simulací jsou znázorněny na obr. 2a. Je zřejmé, že širší štěrbin zvyšují sériovou indukčnost mikropáskového vedení. Větší rozměry  $a$  a  $b$  znamenají větší indukčnost, a tedy nižší mezní frekvenci.



**Obr. 2a** Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro různou šířku  $a$  a délku  $b$  širších segmentů štěrbin  $a = b$  (užší segment má fixní šířku  $g = 0,2 \text{ mm}$ ).

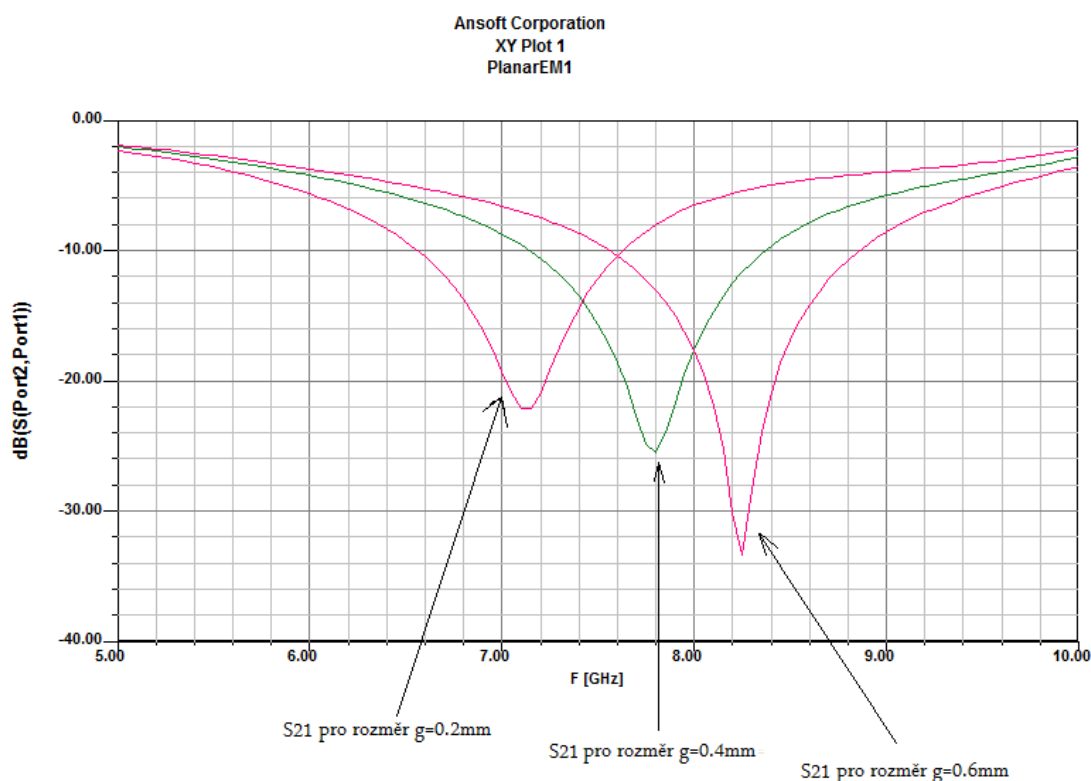


**Obr. 2b** Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro různou šířku  $a$  a délku  $b$  širších segmentů štěrbin  $a \neq b$  (užší segment má fixní šířku  $g = 0,2 \text{ mm}$ ).

V druhé části měníme šířky  $a$  a  $b$  tak, aby byly různé, tj.  $a \neq b$ , ale aby jejich obsahy byly rovny obsahům čtverců z předchozí simulace (obsahy =  $21,16 \text{ mm}^2$ ;  $6,25 \text{ mm}^2$ ;  $3,61 \text{ mm}^2$ ). Výsledky simulací pro obdélníkové tvary jsou znázorněny na obr. 2b. Z dosažených výsledků je vidět, že rezonanční kmitočet má při stejném obsahu větších segmentů (při použití obdélníkových tvarů) posunutí ve frekvenční oblasti směrem na nižší kmitočty. Zároveň však dosahuje lepší strmosti, ale horšího útlumu především na vyšších kmitočtech.

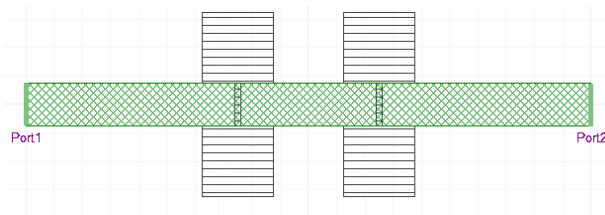
Nyní při fixních rozměrech širších segmentů  $a = b = 2,5 \text{ mm}$  zkoumáme vliv šířky  $g$  úzkého segmentu. Výsledky simulací jsou vykresleny na obr. 3.

Fixní rozměry širších segmentů způsobují, že efektivní sériové indukčnosti jsou konstantní. Změna šířky štěrby  $g$  ovlivňuje pouze hodnotu efektivní kapacity. Čím je větší šířka štěrby, tím menší je efektivní kapacita a tím vyšší je rezonanční frekvence (obr. 3).

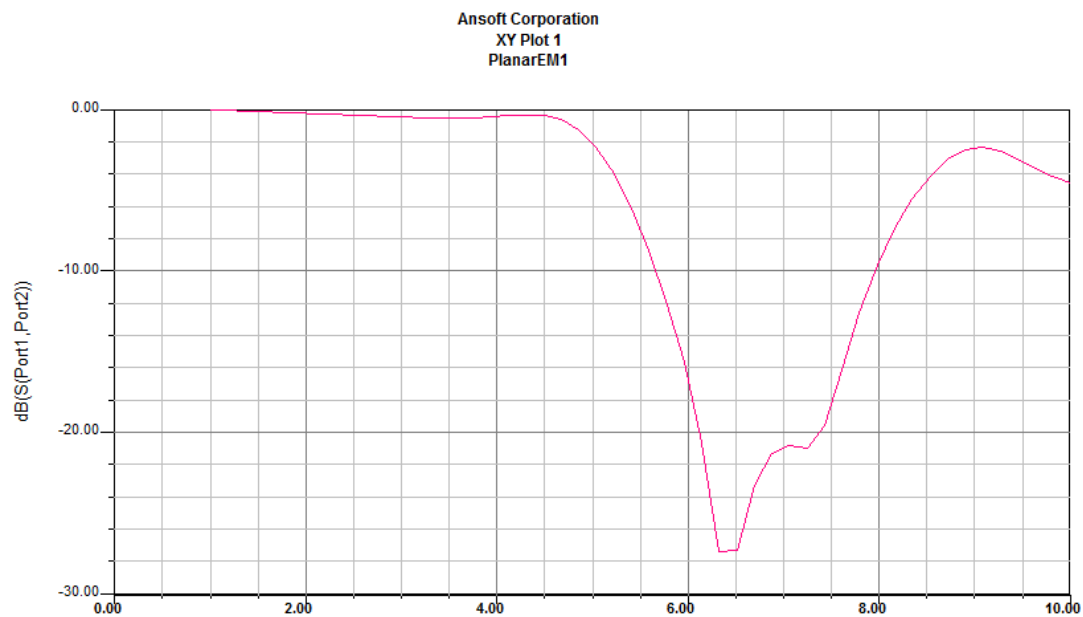


**Obr. 3** Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro různou šířku užší štěrby (širší segment má fixní šířku a fixní délku  $a = b = 2,5 \text{ mm}$ ).

Pro další simulaci zařadíme dvě soustavy narušení za sebe na jedno mikropáskové vedení (obr. 4a), výsledky pro rozměry  $a = b = 2,5 \text{ mm}$  a  $g = 0,2 \text{ mm}$  obou soustav je na obr. 4b. Z výsledků simulace je vidět, že zařazením dalších skupin narušení dosáhneme lepší strmosti a zvětšení zakázaného pásma.

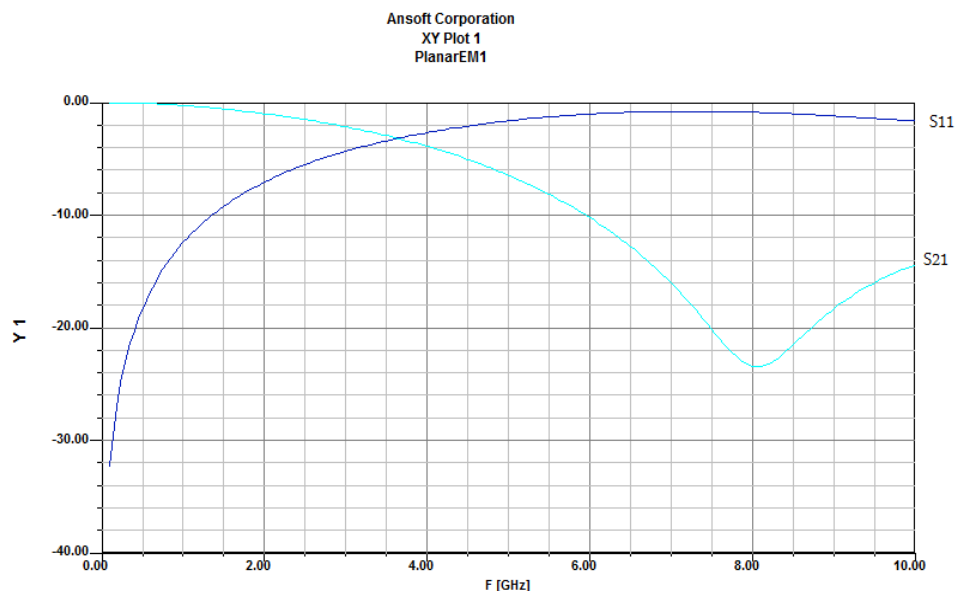


**Obr. 4a** Struktura s narušenou zemí pro dvě soustavy narušení.



**Obr. 4b** Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro šířku užších štěrbin  $g = 0,2$  mm a šířku širších segmentů  $a = b = 2,5$  mm.

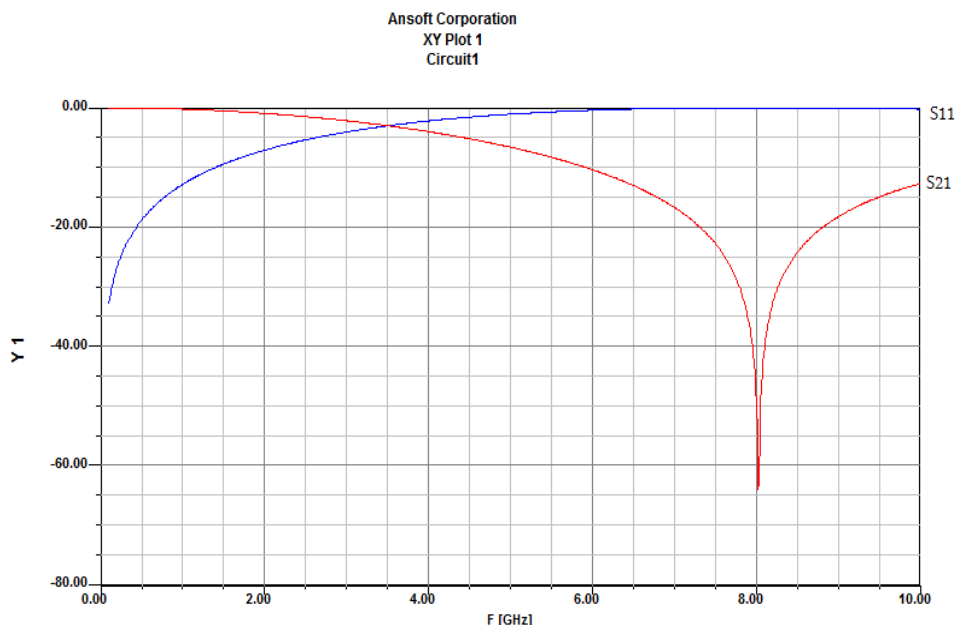
Nyní se zaměříme na náhradu mikropásku s porušenou zemí ekvivalentním obvodem a na určení hodnot prvků ekvivalentního obvodu. Z praktického hlediska můžeme naši strukturu modelovat paralelním rezonančním obvodem zařazeným v podélné větvi vedení. V blízkosti rezonančního kmitočtu rezonanční obvod podélnou větev *přerušuje* svou vysokou impedancí, což se projeví výrazným poklesem přenosu  $s_{21}$  (obr. 5).



**Obr. 5a** Činitel přenosu (modrozelená) a činitel odrazu (modrá) mikropásku s narušenou zemí.

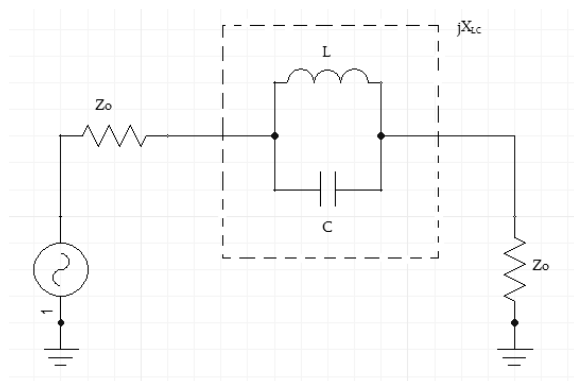
Hodnoty indukčnosti a kapacity náhradního obvodu budeme určovat pro filtr o rozměrech  $a = b = 5,26$  mm,  $w = 1,82$  mm a  $g = 1,00$  mm, který je vyroben ze substrátu

Arlon 25N (výška  $h = 0,79$  mm,  $\varepsilon_r = 3,38$ ). Výsledky simulace tohoto filtru jsou uvedeny na obr. 5a. Je vidět, že rezonanční kmitočet je přibližně 8 GHz.

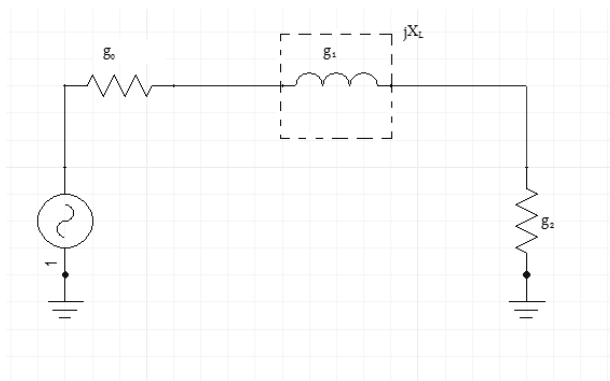


**Obr. 5b** Činitel přenosu (červená) a činitel odrazu (modrá) náhradního LC obvodu.

Parametry prvků náhradního obvodu mohou být odvozeny z výsledků simulace. Kmitočtové průběhy činitele přenosu a činitele odrazu mikropásku s narušenou zemí srovnáváme s průběhy dolní propusti prvního řádu Butterworthova typu o mezním kmitočtu 3,5 GHz.



**Obr. 6** Náhradní obvod mikropásku s narušenou zemí (narušená zemní část ohraňována).



**Obr. 7** Prototypová dolní propust Butterworthova typu prvního řádu.

Hodnoty prvků náhradního obvodu mikropásku s narušenou zemí můžeme určit postupem uvedeným v [1]:

1. Vypočteme reaktanci struktury podle

$$X_{LC} = 1/\omega_0 C \left( \frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right), \quad (1)$$

kde  $\omega_0$  je úhlová rezonanční frekvence paralelního rezonančního obvodu (obr. 5b).

2. Určíme sériovou indukčnost Butterworthova filtru dolní propusti (obr. 7) podle

$$X_L = \omega' \cdot Z_0 g_1, \quad (2)$$

kde  $\omega'$  je normovaný úhlový kmitočet,  $Z_0$  je charakteristická impedance vstupního a výstupního portu a  $g_1$  je koeficient Butterworthovy prototypové dolní propusti.

3. Náhradní obvod struktury s porušenou zemí (obr. 6) musí být ekvivalentní dolní propusti (obr. 7)

$$X_{LC}|_{\omega=\omega_c} = X_L|_{\omega'=1}. \quad (3)$$

kde  $\omega_c$  je kritický úhlový kmitočet dolní propusti (obr. 5b).

4. Z rovnosti (3) vypočteme kapacitu náhradního obvodu

$$C = \frac{\omega_c}{Z_0 \cdot g_1} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega_c^2}. \quad (4)$$

Číselně vychází  $C = 0,11$  pF.

5. Ze vztahu pro rezonanční kmitočet paralelního rezonančního obvodu

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (5)$$

vypočteme hodnotu indukčnosti náhradního obvodu  $L = 3,68$  nH.

Ze vztahů (4) a (5) můžeme vypočíst parametry náhradních obvodů, které odpovídají různým délkám a šířkám štěrbin (viz obr. 2 a 3). Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

	Rozměry struktury narušení zemní plochy ( $g=0.2$ mm)		
	$a=b=1.9$ mm	$a=b=2.5$ mm	$a=b=4.6$ mm
Indukčnost [nH]	1.104	1.396	3.046
Kapacita [pF]	0.333	0.355	0.393
Mezní frekvence [GHz]	6.250	5.250	3.000
Rezonanční frekvence [GHz]	8.300	7.150	4.600

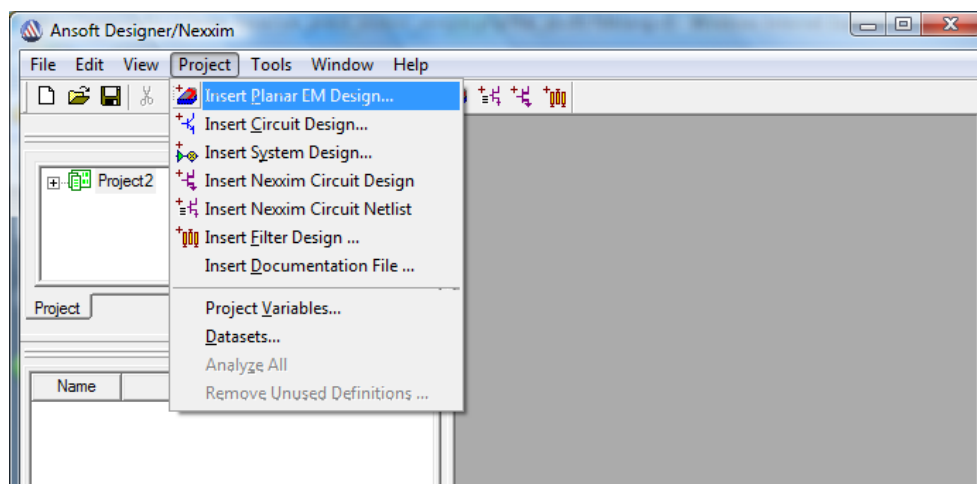
**Tab. 1** Parametry náhradního obvodu mikropásku s porušenou zemí pro různé rozměry širší štěrbin při fixní šířce užší štěrbin  $g = 0,2$  mm.

	Rozměry struktury narušení zemní plochy ( $a=b=2.5$ mm)		
	$g=0.2$ mm	$g=0.4$ mm	$g=0.6$ mm
Indukčnost [nH]	1.396	1.330	1.378
Kapacita [pF]	0.355	0.323	0.272
Mezní frekvence [GHz]	5.250	5.600	5.800
Rezonanční frekvence [GHz]	7.150	7.680	8.220

**Tab. 2** Parametry náhradního obvodu mikropásku s porušenou zemí pro různé šířky užší štěrbin při fixních rozměrech širší štěrbin  $a = b = 2,5$  mm.

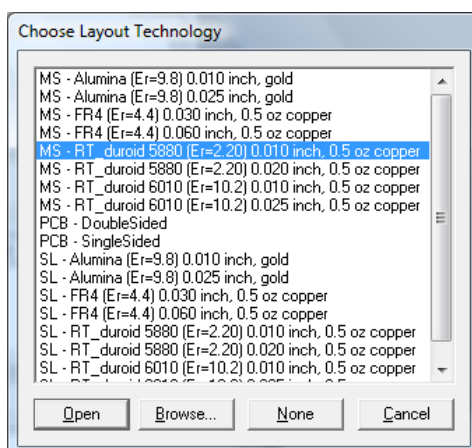
### 3 Modelování v programu ANSOFT Designer

Ansoft Designer je program, který v sobě integruje moduly pro numerickou analýzu planárních struktur momentovou metodou, pro simulování vysokofrekvenčních obvodů a pro modelování komunikačních zařízení na systémové úrovni. Díky těmto schopnostem můžeme v programu vytvořit modely jednotlivých komponentů komunikačního řetězce, můžeme je složit dohromady a ověřit tak činnost celého zařízení [2].



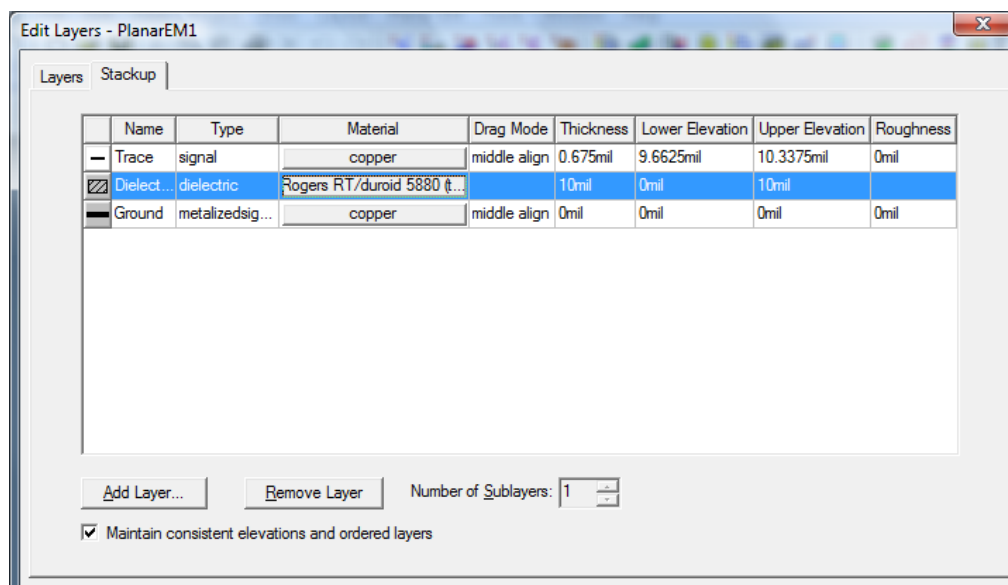
Obr. 8 Výběr modulu pro numerickou analýzu planárních struktur.

Po spuštění programu vybereme ze základního menu *Project* položku *Insert Planar EM Design* (obr. 8). Tím otevřeme modul pro numerickou analýzu planární struktury. V následném kroku z nabídky dostupných substrátů vybereme materiál, z něhož je vyroben modelovaný obvod (obr. 9).



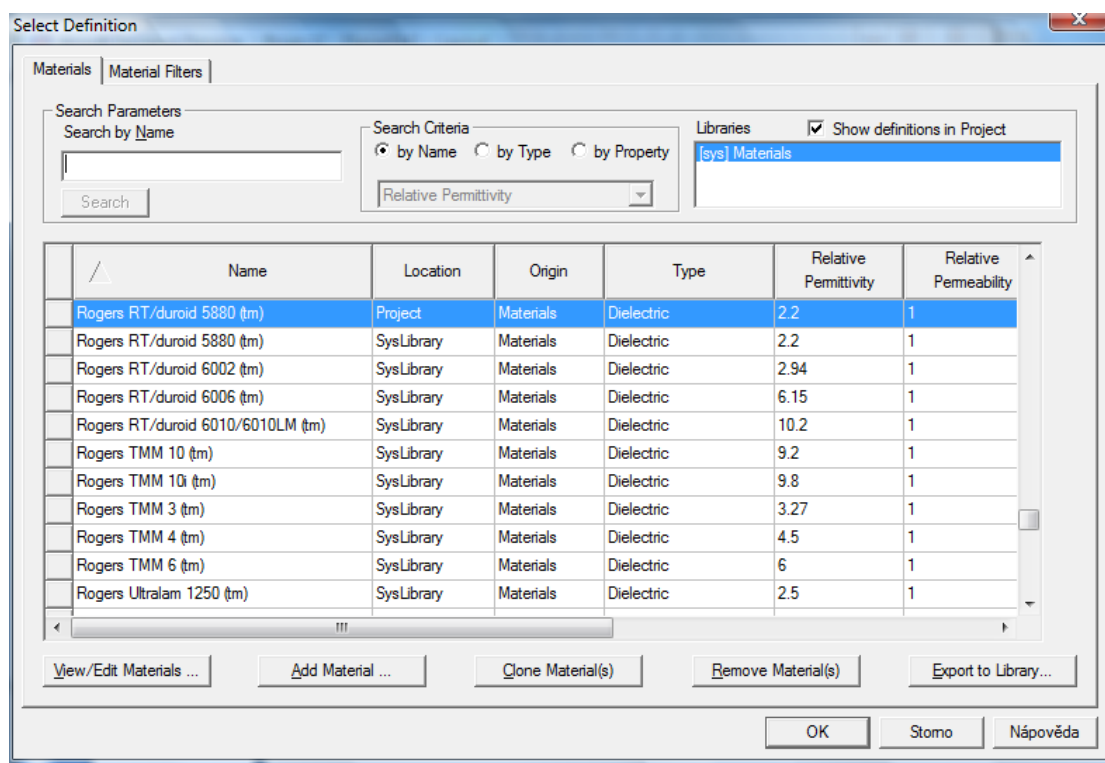
Obr. 9 Dialog pro výběr substrátu.

V případě, že v seznamu není uveden substrát požadovaných parametrů, vybereme substrát obdobný a jeho parametry změníme: výběrem položku menu *Layers* → *Layout* a v okně *Edit Layers* (obr. 10) vybereme záložku *Stack up*. Sloupec *Name* nás informuje o názvu vrstvy, *Type* značí funkci vrstvy a *Material* udává materiál vrstvy. Kliknutím na tlačítko použitého materiálu se dostaneme do databáze mikrovlnných materiálů, kde lze vybrat existující materiál, vytvořit nový materiál (*Add material*), upravit elektromagnetické parametry materiálu stávajícího (*Edit material*) nebo klonovat vybraný materiál (*Clone Material*); viz obr. 11.



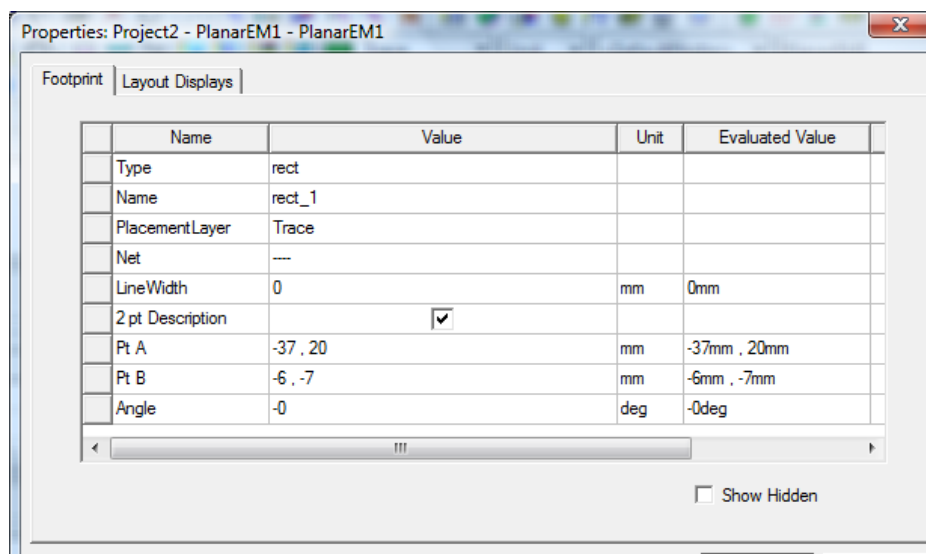
**Obr. 10** Dialog pro úpravu parametrů substrátu.

Další sloupce v tabulce okna *Edit Layers* (obr. 10) udávají tloušťku vrstvy (*Thickness*), svislou souřadnici dolní plochy vrstvy (*Lower Elevation*) a svislou souřadnici horní plochy vrstvy (*Upper Elevation*).



**Obr. 11** Podrobná databáze substrátů.

Máme-li zadán substrát, můžeme přikročit ke kreslení motivu filtru s narušenou zemí (obr. 1). K tomu slouží grafický editor, který je součástí programu Ansoft Designer.

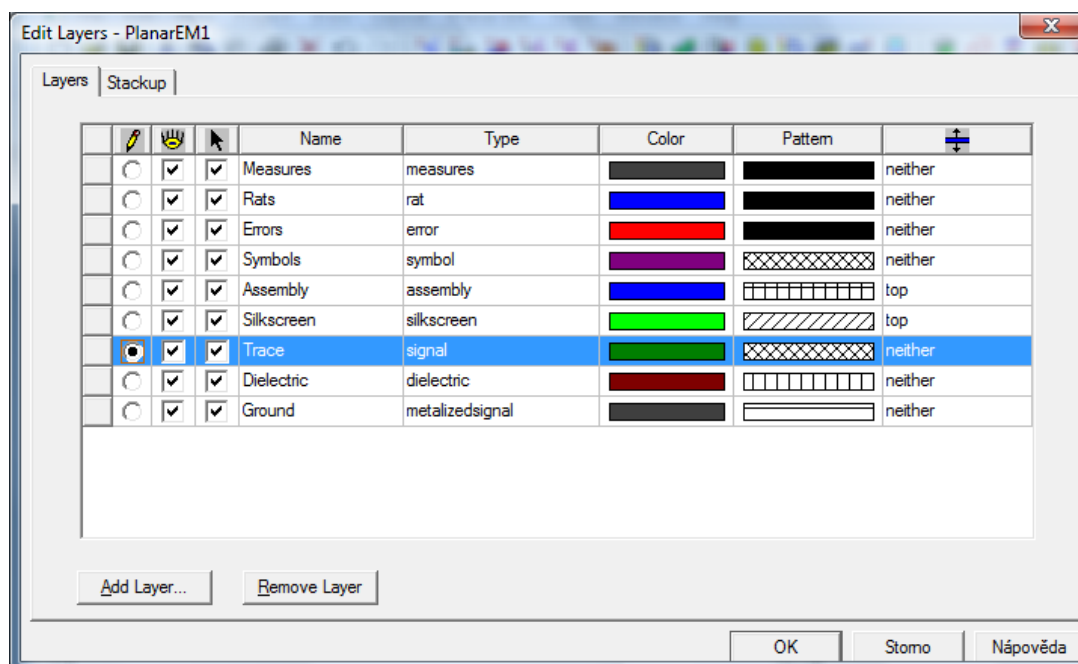


**Obr. 12** Dialog pro úpravu parametrů kresleného objektu.

V menu vybereme vhodný nástroj pro kreslení (*Draw* → *Primitive*) a myší nakreslíme požadovaný obrazec. Přesné rozměry obrazce můžeme zadat pomocí dialogu *Properties* (obr. 12). Do položky *Width* zadáváme šířku, do *Height* výšku a do *Angle* úhel natočení obrazce. Polohu obrazce vůči středu kreslicí plochy zadáváme do položky *Center*.

Skládá-li se výsledný motiv z více prvků, je třeba sloučit je v jeden celek. Po označení požadovaných částí výběrovým nástrojem (vybrané prvky zčervenají), zvolíme položku menu *Layout* → *Merge Polygons* → *Union*, čímž dojde k sjednocení.

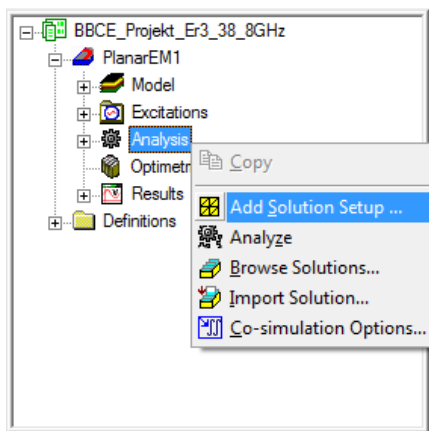
Potřebujeme-li vykreslit objekt v jiné hladině, vybereme v záložce *Layout* → *Layers* požadovanou hladinu (obr. 13). Vybereme-li hladinu *Ground*, je nakreslený objekt odstraněn ze zemní plochy. Vybereme-li hladinu *Trace*, je objekt nanesen na lícni stranu substrátu.



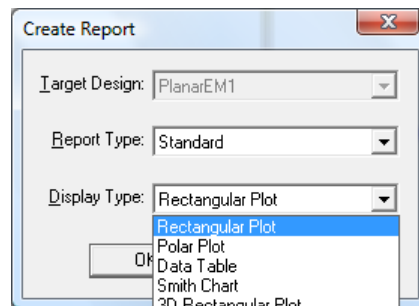
**Obr. 13** Dialog pro výběr kreslení hladin.



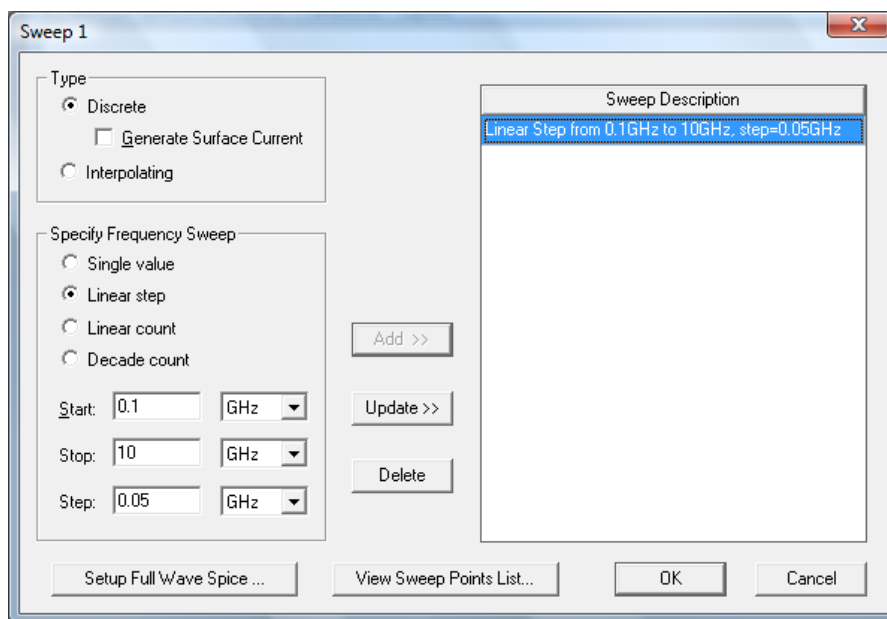
Máme-li nastaveny parametry substrátu a vytvořen motiv filtru, můžeme specifikovat parametry analýzy: v okně projektu (obr. 14) pravým tlačítkem myši klikneme na položku *Analysis* a vybereme *Add Solution Setup*. Do zobrazeného dialogu zadáme hodnotu středního kmitočtu analýzy (pro tento kmitočet se vytvoří diskretizační síť numerické analýzy).



**Obr. 14** Okno projektu a inicializace nové analýzy



**Obr. 15** Dialog pro výběr typu grafu pro vizualizaci výsledků.



**Obr. 16** Dialog pro nastavení kmitočtového rozmitání.

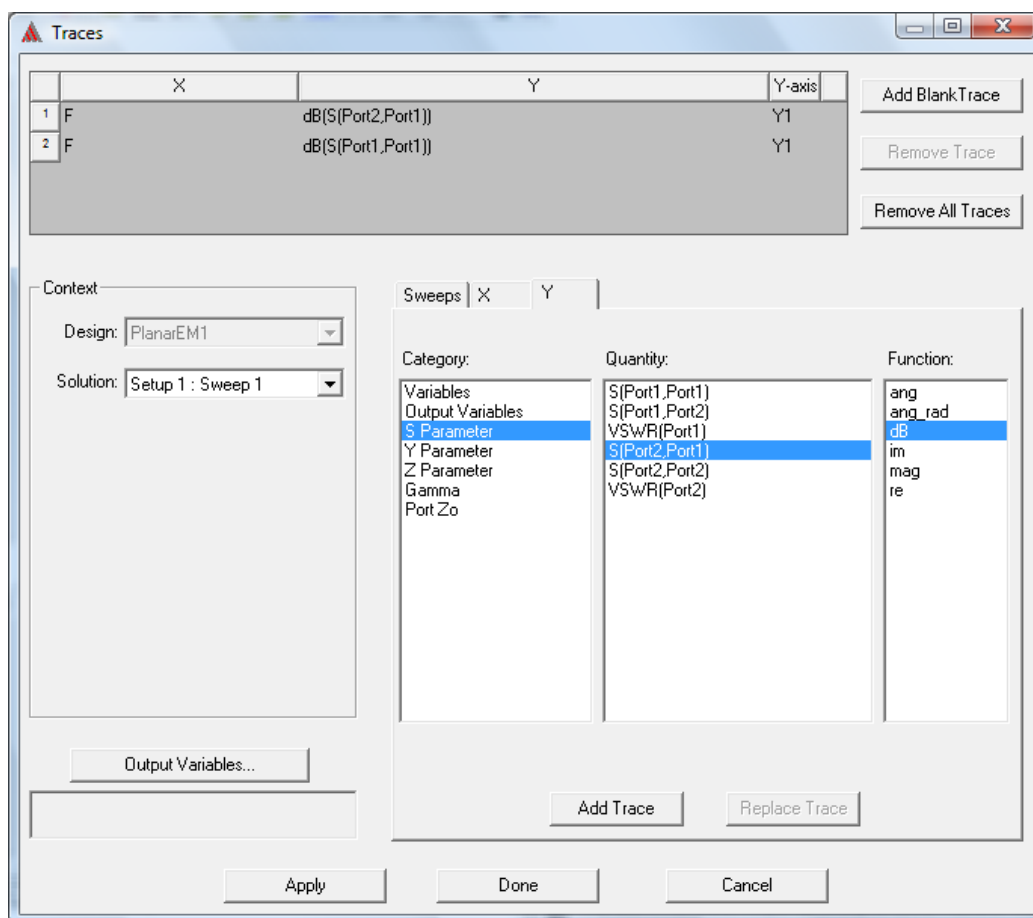
Nyní se nám vytvořila nová položka *Setup*, která je podřazena položce *Analysis*. Kmitočtové rozmitání analýzy nastavíme v okně projektu výběrem *Setup* → *Add Frequency Sweep* v zobrazeném dialogu (obr. 16): klikneme na předdefinovaný rozsah, přepíšeme původní hodnoty a zadání potvrdíme tlačítkem *Update*.

Na výběr máme několik způsobů rozmitání. *Single value* je analýza na jediné frekvenci. Pro analýzu s přesným kmitočtovým krokem volíme *Linear Step*, pro analýzu s požadovaným počtem kmitočtových kroků volíme *Linear count* nebo *Decade count*.

Případné chyby nastavení lze před spuštěním zkontrolovat pomocí *Planar EM* → *Validation Check*. Analýzu spustíme kliknutím pravým tlačítkem myši na položku *Analysis* a výběrem položky *Analyze* (obr. 14). Doba trvání analýzy se odvíjí od zadaného počtu kroků analýzy a složitosti analyzované struktury.

Po analýze struktury je třeba nastavit parametry zobrazení výsledků. Položka *Results* v okně projektu nabízí po kliknutí pravým tlačítkem myši položku *Create Report*, díky níž se dostaneme do dialogu pro nastavení grafu. První dialog (obr. 15) slouží k nastavení typu grafu (kartézský, polární, Smithův, aj.) nebo k zobrazení tabulky výsledných hodnot (*Data table*).

V našem případě volíme zobrazení do kartézského grafu (*Rectangular Plot*). V následném dialogu *Traces* vybereme zobrazovanou veličinu a její jednotky. V levé části *Context* vybereme požadovanou analýzu v případě, že máme více analýz v jedné simulaci. Výběr veličin a jednotek provedeme v záložce *Y* označením veličiny a jednotky v sekcích *Category*, *Quantity*, *Function*. Tlačítkem *Add Trace* přidáme výběr mezi veličiny, které budou zobrazeny ve výsledném grafu (jsou zobrazeny v horním šedém rámečku); viz obr. 17.



**Obr. 17** Dialog pro sestavení pravoúhlého grafu.

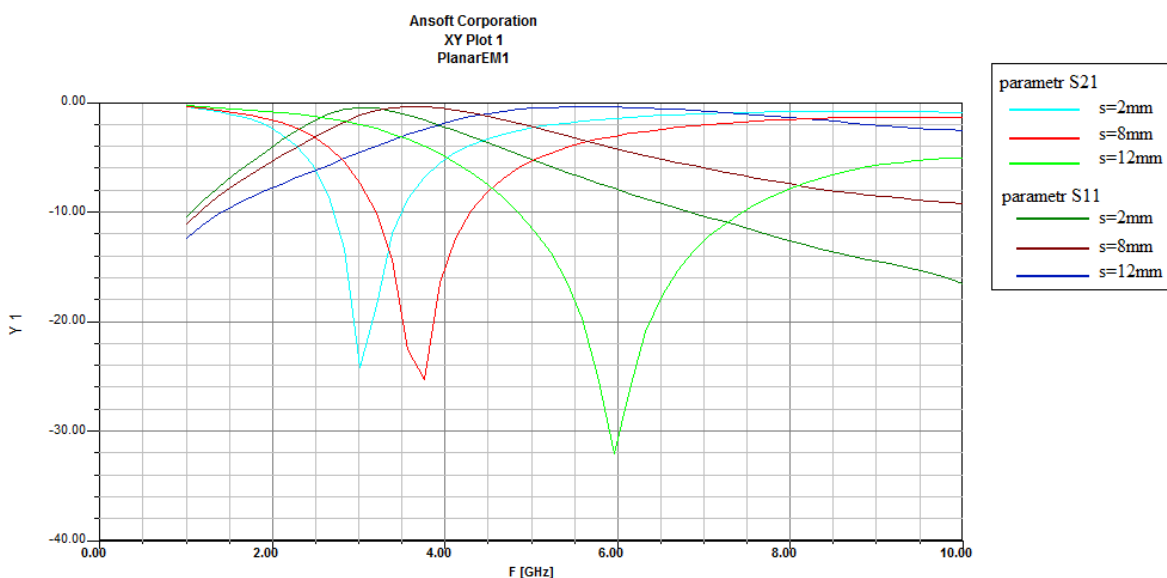
Kompletní výsledek analýzy mikropásku s porušenou zemí je zobrazen na obr. 18.



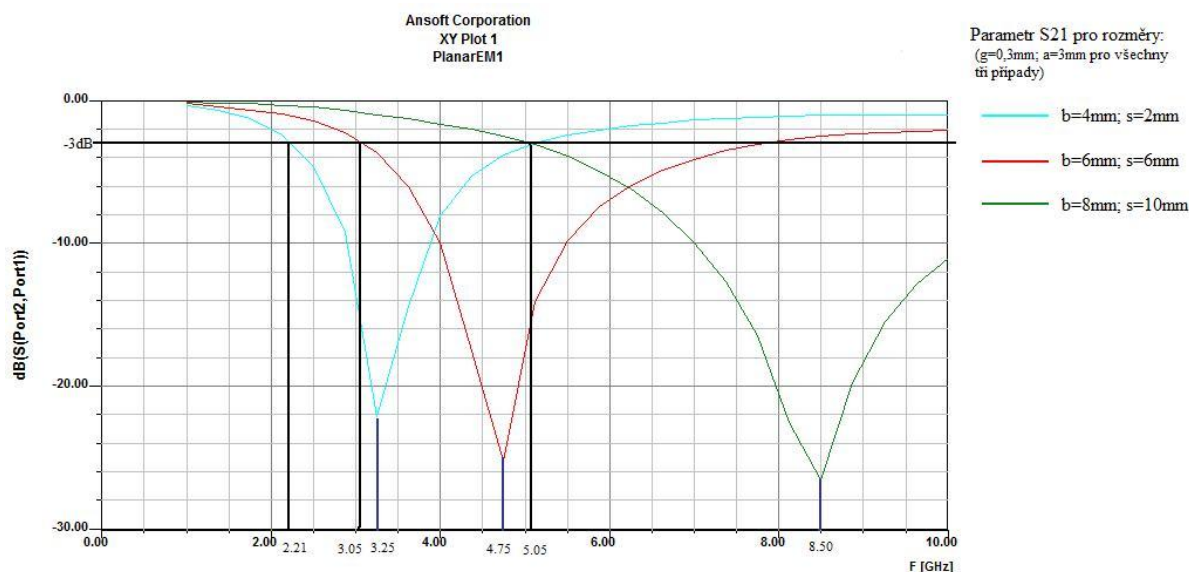


Pro zlepšení strmosti a zvýšení nepropustného pásma je zapotřebí přidat další soustavu s narušenou zemní částí. V této části postupujeme tak, že vycházíme z předešlé soustavy následovným způsobem. Zvolíme rozměry druhé soustavy o něco málo menší než v soustavě první. Tím dostaneme druhý rezonanční kmitočet, jenž je posunut ve frekvenční oblasti k vyšší frekvenci. Z toho vyplývá, že se nám zvětší šířka nepropustného pásma a zároveň se nám zvýší strmost filtru. Pro lepší parametry se dá zařadit další soustava stejným postupem. V našem případě se jedná o tři soustavy, z nichž jsme extrahovali hodnoty mezních a rezonančních kmitočtů (obr. 23).

Jedním z dalších ovlivňujících faktorů filtru je i délka  $s$  menšího segmentu (obr. 21). Pro tento parametr je na obr. 22 výsledná simulace.



**Obr. 22** Výsledky simulace pro délku menšího segmentu při fixních hodnotách  $a = 8\text{ mm}$ ,  $b = 3\text{ mm}$  a  $g = 0,2\text{ mm}$ .



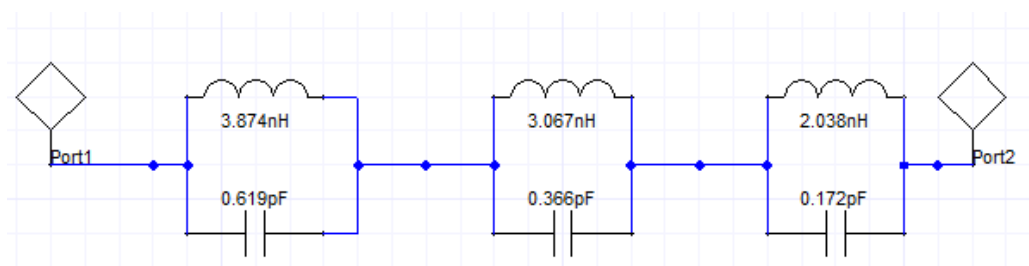
**Obr. 23** Výsledky simulace činitele přenosu pro tři soustavy narušení země.

Z výsledků simulace a pomocí vzorců (4) a (5) můžeme sestavit náhradní obvod, jenž má podobu sériově řazených paralelních LC rezonančních obvodů.

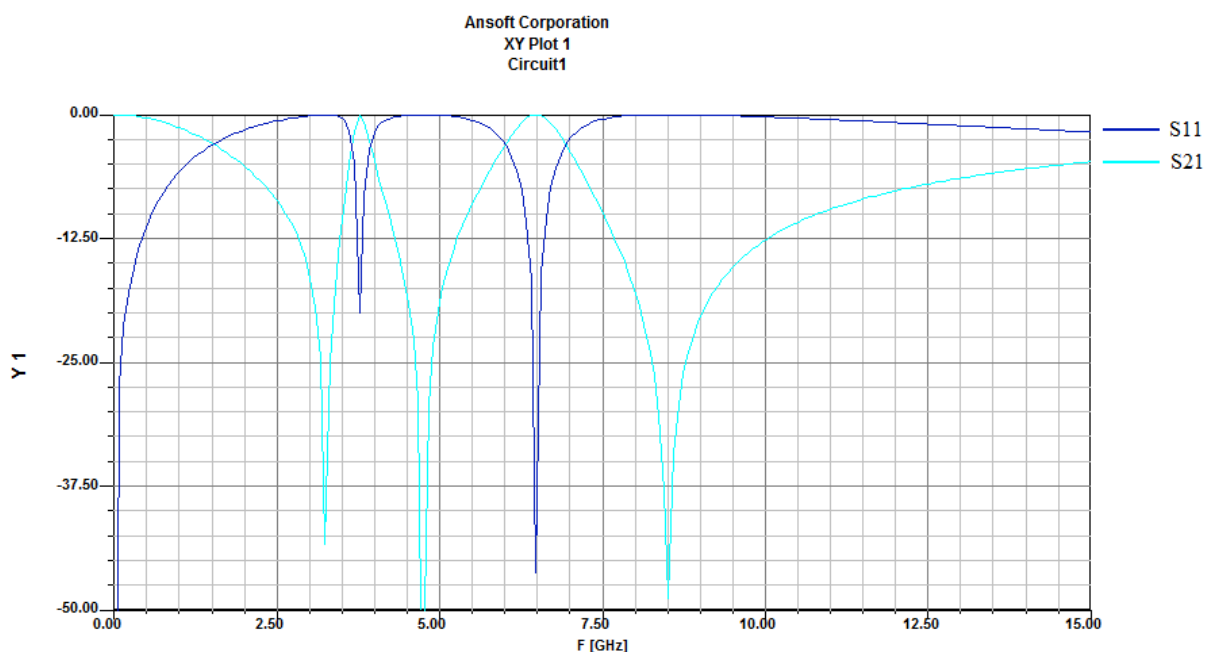
	Rozměry struktury narušení zemní plochy ( $g=0,3\text{mm}$ ; $a=3\text{mm}$ )		
	$b=4\text{mm}$ ; $s=2\text{mm}$	$b=6\text{mm}$ ; $s=6\text{mm}$	$b=8\text{mm}$ ; $s=10\text{mm}$
Indukčnost [nH]	3,874	3,067	2,038
Kapacita [pF]	0,619	0,366	0,172
Mezní frekvence [GHz]	2,210	3,050	5,050
Rezonanční frekvence [GHz]	3,250	4,750	8,500

**Tab. 3** Parametry náhradního obvodu mikropásku s porušenou zemí pro různé hodnoty  $b$  a  $s$  při fixních rozměrech  $g = 0,3 \text{ mm}$  a  $a = 3 \text{ mm}$ .

Z hodnot uvedených v tab. 3 jsme sestavili náhradní obvod pro navrženou strukturu, která je znázorněna na obr. 24.

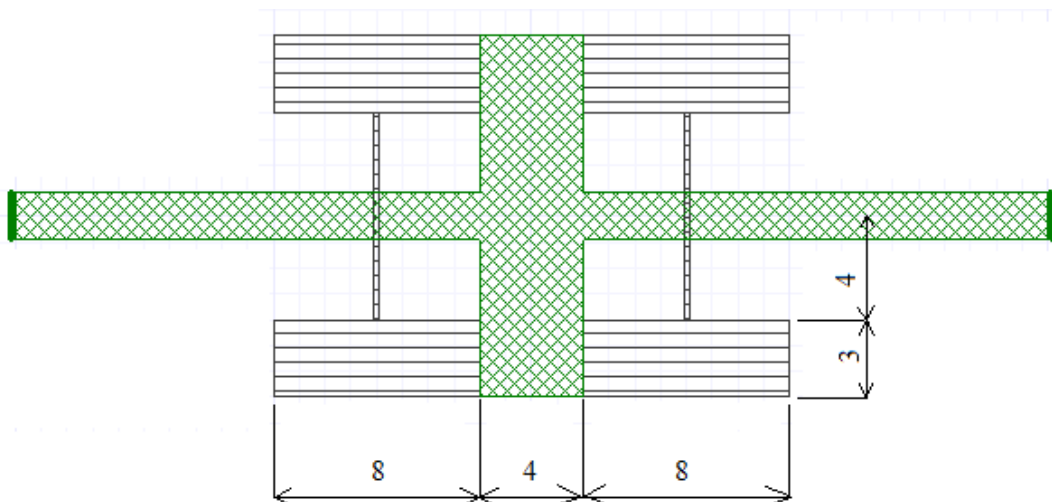


**Obr. 24** Náhradní obvod pro strukturu se třemi soustavami narušení.

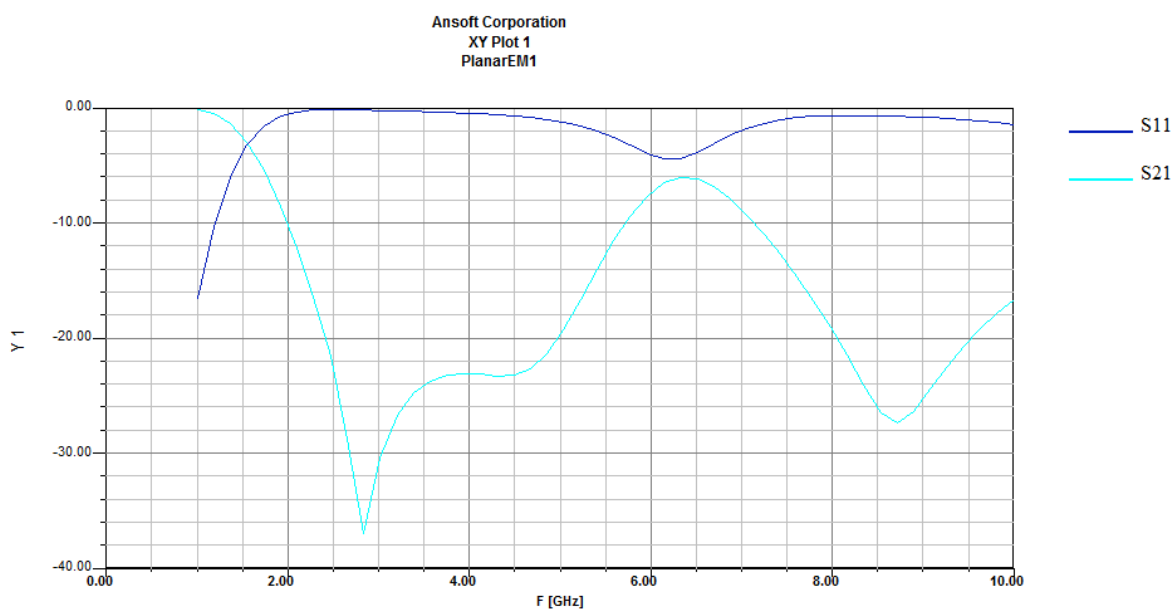


**Obr. 25** Činitel přenosu a činitel odrazu náhradního obvodu pro strukturu se třemi soustavami narušení.

V další části je vhodné doplnit filtr kapacitními pahýly (viz obr. 26) a tím získat ještě větší nepropustné pásmo, jak je znázorněno na obr. 27. Kapacitní pahýly se umísťují co nejblíže k narušeným segmentům a jejich velikost nepřesahuje velikosti soustav.

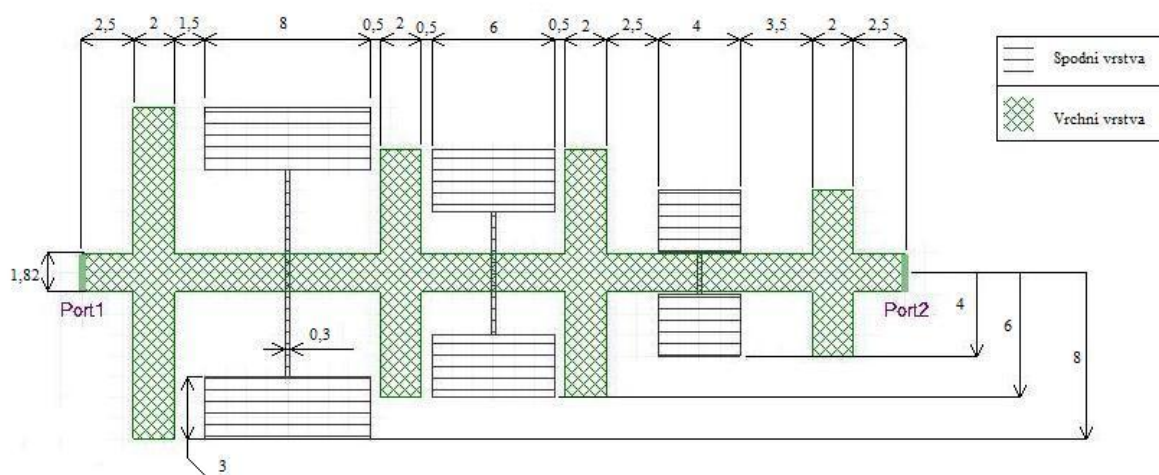


**Obr. 26** Mikropáskové vedení s narušenou zemí včetně kapacitních pahýlů.

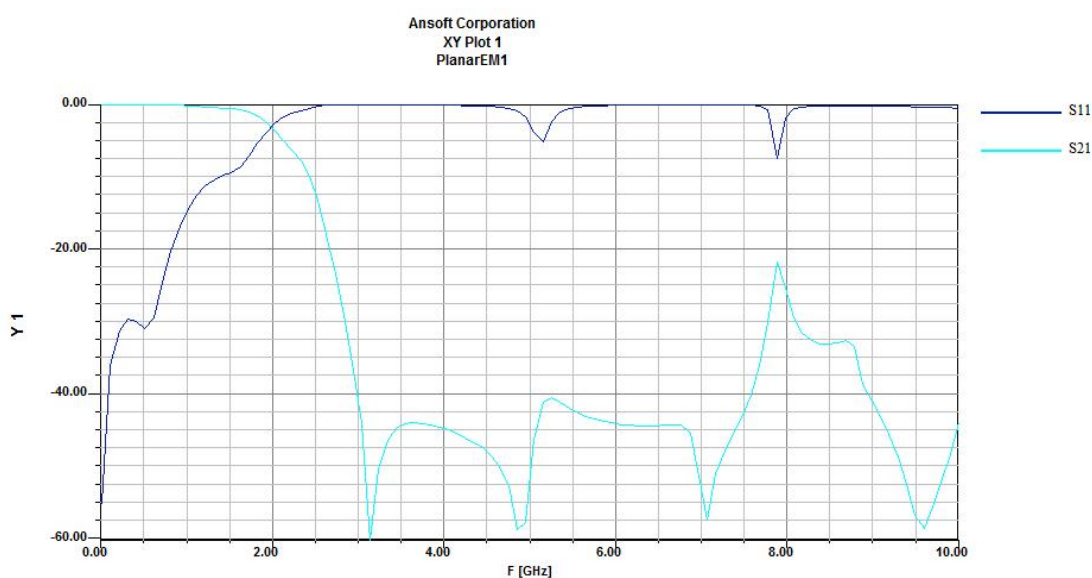


**Obr. 27** Činitel přenosu a činitel odrazu mikropáskového vedení s narušenou zemí včetně kapacitních pahýlů.

Poslední částí je doplnění vhodného počtu soustav s narušenou zemí a vhodného počtu kapacitních pahýlů. Takto navržená DP i s konkrétními rozměry jednotlivých částí je uvedena na obr. 28. Její simulací (viz obr. 29) jsme obdrželi mezní kmitočet pro pokles 3 dB 2,21 GHz a nepropustné pásmo nepřekračující hodnotu vyšší než -19 dB (na kmitočtu kolem 7,8 GHz) s nejnižší hodnotou -60 dB na kmitočtu kolem 3,2 GHz.

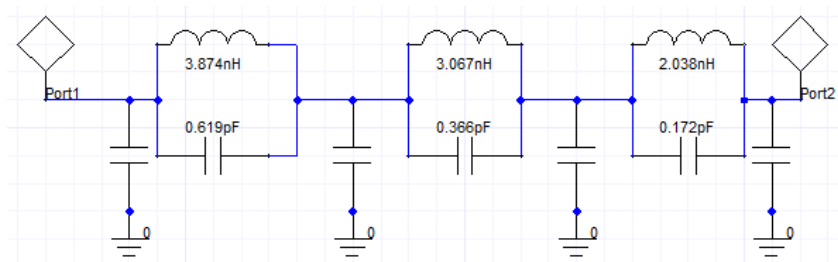


**Obr. 28** Výsledná DP mikropáskového vedení s narušenou zemí.



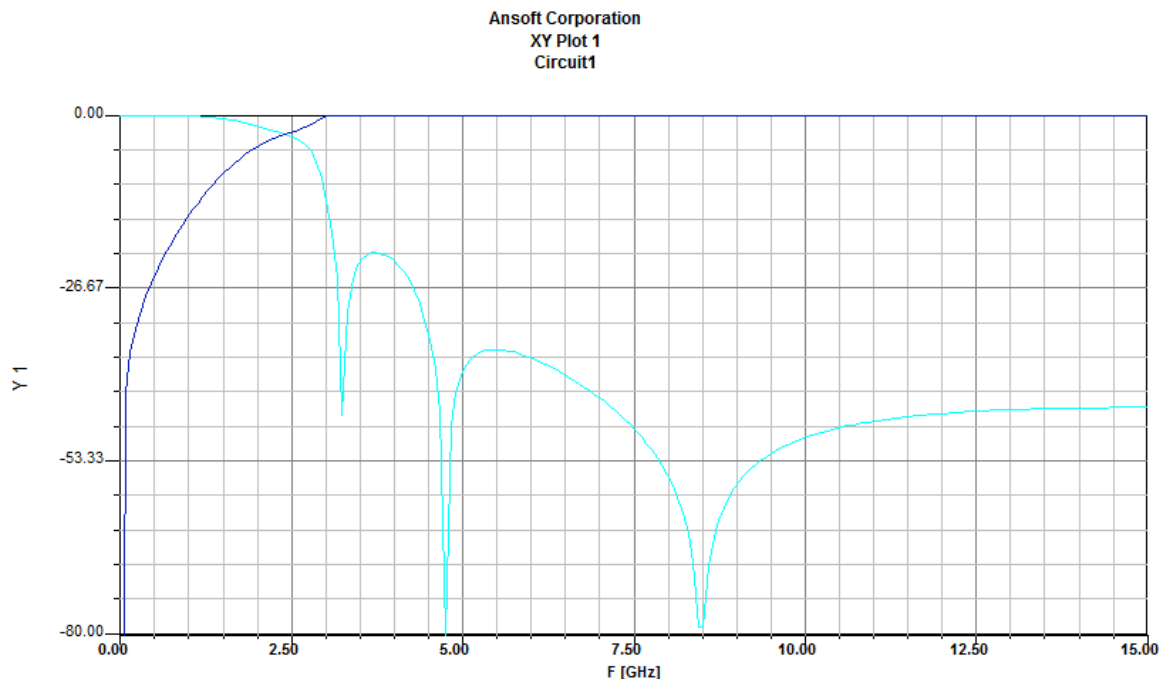
**Obr. 29** Výsledný číselník přenosu a číselník odrazu navrhované DP.

Dále jsme pak pomocí získaných hodnot z tab. 3 a z analýzy mikropáskového vedení s kapacitními pahýly získali náhradní obvod, jenž je zobrazen na obr. 30. Tomuto obvodu pak odpovídá výsledný činitel přenosu a činitel odrazu, který je zobrazen na obr. 31.



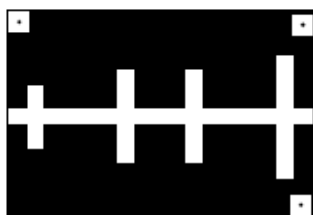
**Obr. 30** Náhradní obvod výsledné DP.



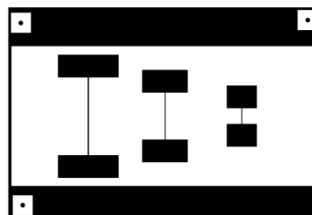


**Obr. 31** Výsledný činitel přenosu a činitel odrazu náhradního obvodu navrhované DP.

Nyní, když máme odsimulovanou a navrženou DP, můžeme ji zrealizovat. Postup realizace je následovný. Neboť máme nejmenší velikost (šířka menšího segmentu  $g$ ) rovnu 0,3 mm, můžeme použít metodu vyleptání mědi pomocí průsvitného papíru, na jehož stranu natiskneme vrchní část (obr. 32a) navrženého filtru v měřítku 1:1, na papír druhý pak obdobným způsobem část spodní (obr. 32b) ve stejném měřítku. Vytisknutý obrazec musí mít tyto vlastnosti. Místo, kde má zůstat měď, musí zůstat v původní barvě papíru, tj. bílá (průsvitná). Navíc je potřeba zajistit, aby obě části (vrchní i spodní) byly správně umístěny. K tomuto účelu nám slouží tzv. sesazovací body, díky nimž se budou oba obrazce při jejich vzájemném překrytí shodovat v rozměrech uvedených na obr. 28.

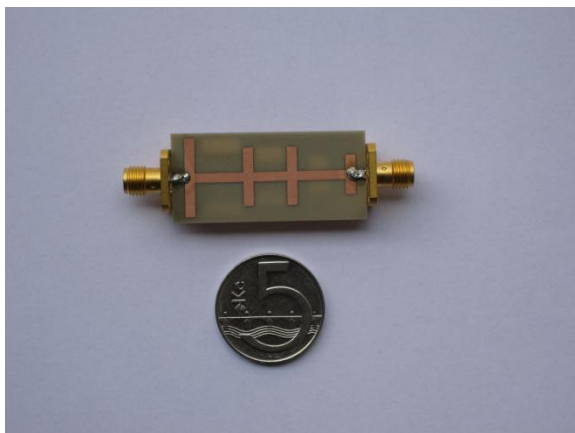


**Obr. 32a** Vrchní vrstva navrhované DP.  
Měřítko 1:1.

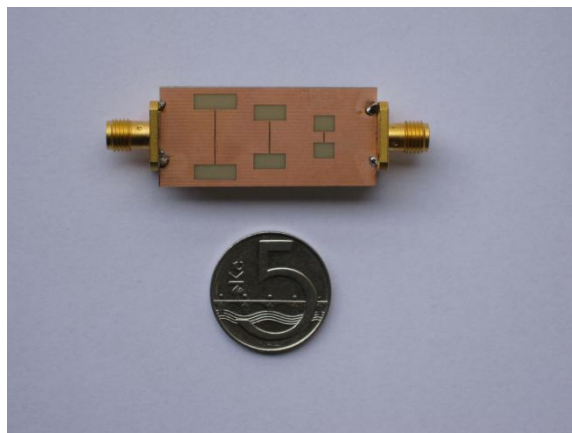


**Obr. 32b** Spodní vrstva navrhované DP  
zrcadlově obrácená k vrstvě vrchní.  
Měřítko 1:1.

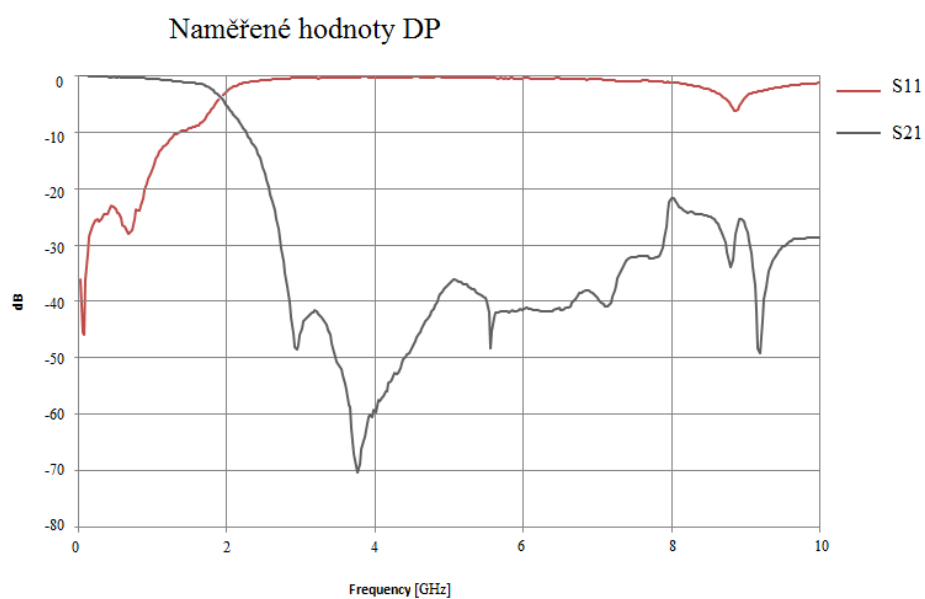
Máme-li filtr navržený a vyrobený, můžeme přejít k samotnému měření. Filtr připojíme k měřicímu přístroji pomocí portů, jež připájíme na hotový výrobek (obr. 33). Změřené hodnoty činitele přenosu a činitele odrazu jsou vyobrazeny na obr. 34.



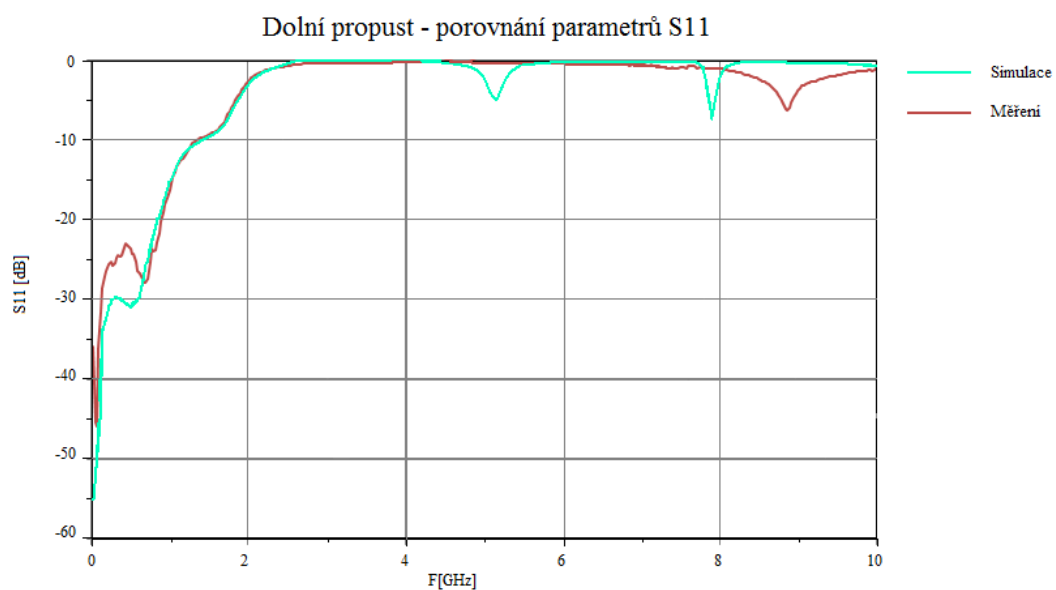
**Obr. 33a** Vrchní vrstva navrhované DP.



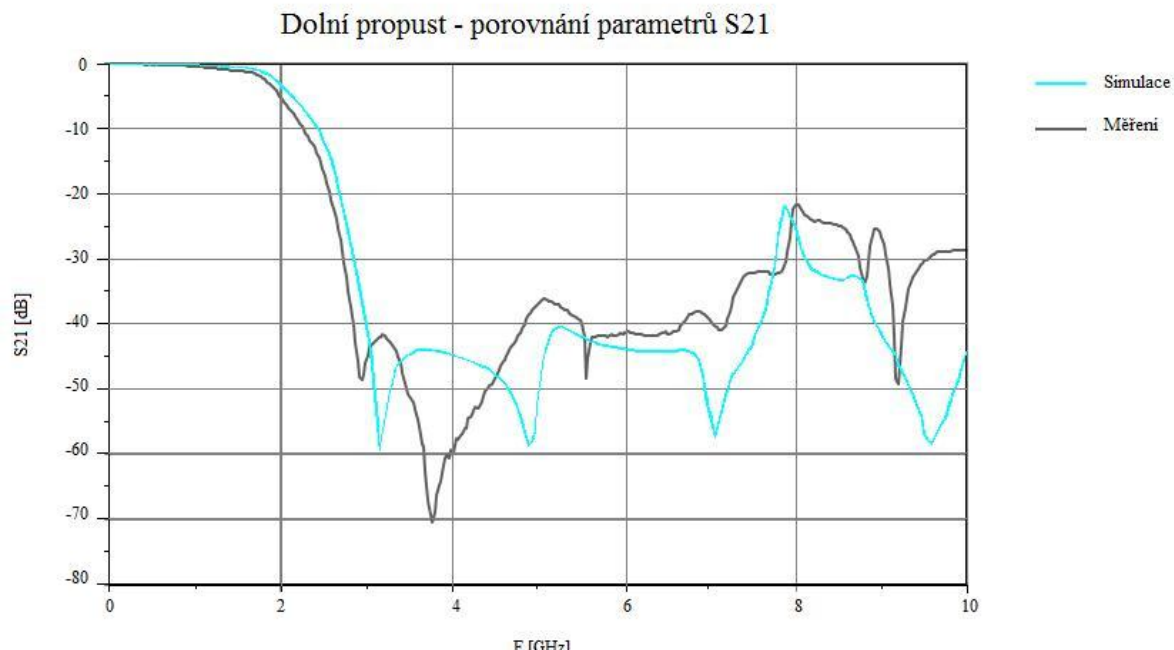
**Obr. 33b** Spodní vrstva navrhované DP.



**Obr. 34** Naměřené výsledné hodnoty činitele přenosu a činitele odrazu navržené DP.



**Obr. 35** Porovnání hodnot  $s_{11}$  získaných měřením a simulací.



**Obr. 36** Porovnání hodnot  $s_{21}$  získaných měřením a simulací.

## 6 Závěr

Tato práce byla zaměřena na struktury planárních filtrů s narušenou zemí a zkoumání vlastností. Dále pak realizaci a simulaci dolní propusti s použitím této struktury. Tato metoda je vhodná ke zmenšení konvenčně používaných planárních filtrů. Touto strukturou se dá dosáhnout relativně velkých strmostí a nepropustných pásem s poměrně malými filtry. Oproti tomu klasický filtr by k dosažení takových výsledků potřeboval vysoké řády a tím by se jeho tvary, především induktivní části, značně protáhly.

Výsledky realizované DP velmi dobře odpovídají výsledkům teoretickým získaným z jednotlivých simulací. V případě, že bychom potřebovali tento filtr umístit do nějakého pouzdra, bylo by zapotřebí použít jiný program, v němž bychom ověřili funkčnost filtru v uzavřeném pouzdru.

## Literatura

- [1] AHN, D., PARK, J. S., KIM, C. S., KIM, J., QIAN, Y., ITOH, T. *A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, vol. 49, no. 1, p. 86-93.
- [2] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů*. Brno: VUT, 2004. 97 s. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] CHEN X. Q., LI R., SHI S. J., WANG Q., XU L. AND SHI X. W. *A novell low pass filter using elliptic shape defected ground structure*. Progress In Electromagnetics Research B, 2008, vol. 9, p. 117–126.
- [4] ANSOFT CORPORATION [online]. poslední revize 2009 [citováno dne 2009-04-25]. dostupné z: <<http://www.ansoft.com.cn/downmaterials/Events&training/Events/HF2003roadshow/Presentation/12.pdf> >

## Seznam symbolů

$a$	šířka širšího segmentu štěrbiny
$b$	délka širšího segmentu štěrbiny
$g$	šířka užšího segmentu štěrbiny
$h$	výška dielektrického substrátu
$s$	délka užšího segmentu štěrbiny
$\epsilon_r$	relativní permitivita dielektrického substrátu
$C$	kapacita ekvivalentního rezonančního obvodu
$L$	indukčnost ekvivalentního rezonančního obvodu
$s_{11}$	činitel odrazu
$s_{21}$	činitel přenosu
$w$	šířka pásku
$Z_0$	charakteristická impedance vedení
$\omega$	úhlová frekvence
$\omega_c$	úhlová mezní frekvence
$\omega_0$	úhlová rezonanční frekvence
$f_0$	rezonanční frekvence

## Seznam obrázků

1.	Mikropáskové vedení s narušenou zemí.....	7
2a	Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro různou šířku $a$ a délku $b$ širších segmentů štěrbiny (užší segment má fixní šířku $g = 0,2$ mm).....	8
2b	Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro různou šířku $a$ a délku $b$ širších segmentů štěrbiny $a \neq b$ (užší segment má fixní šířku $g = 0,2$ mm). ....	8
3.	Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro různou šířku užší štěrbiny (širší segment má fixní šířku $a$ a fixní délku $a = b = 2,5$ mm).....	9
4a	Struktura s narušenou zemí pro dvě soustavy narušení.....	9
4b	Činitel přenosu mikropásku s narušenou zemí pro šířku užších štěrbin $g = 0,2$ mm a šířku širších segmentů $a = b = 2,5$ mm.....	10
5a	Činitel přenosu (modrozelená) a činitel odrazu (modrá) mikropásku s narušenou zemí. ....	10
5b	Činitel přenosu (červená) a činitel odrazu (modrá) náhradního LC obvodu.....	11
6.	Náhradní obvod mikropásku s narušenou zemí (narušená zemní část ohraničena). ....	11
7.	Prototypová dolní propust Butterworthova typu prvního řádu .....	11
8.	Výběr modulu pro numerickou analýzu planárních struktur.....	13
9.	Dialog pro výběr substrátu .....	13
10.	Dialog pro úpravu parametrů substrátu .....	14
11.	Podrobná databáze substrátů .....	14

12.	Dialog pro úpravu parametrů kresleného objektu .....	15
13.	Dialog pro výběr kreslení hladin. ....	15
14.	Okno projektu a inicializace nové analýzy pro vizualizaci výsledků.....	16
15.	Dialog pro výběr typu grafu .....	16
16.	Dialog pro nastavení kmitočtového rozmítání .....	16
17.	Dialog pro sestavení pravoúhlého grafu.....	17
18.	Kompletní výsledek analýzy mikropásku s narušenou zemí.....	18
19.	Rozměry dolní propusti podle [2].....	18
20.	Rozměry mikropásku s narušenou zemí.....	19
21.	Mikropáskové vedení s narušenou zemí.....	19
22.	Výsledky simulace pro délku menšího segmentu při fixních hodnotách $a = 8 \text{ mm}$ $b = 3 \text{ mm}$ a $g = 0,2 \text{ mm}$ . ....	20
23.	Výsledky simulace činitele přenosu pro tři soustavy narušení země .....	20
24.	Náhradní obvod pro strukturu se třemi soustavami narušení. ....	21
25.	Činitel přenosu a činitel odrazu náhradního obvodu pro strukturu se třemi soustavami narušení.....	21
26.	Mikropáskové vedení s narušenou zemí včetně kapacitních pahýlů.....	22
27.	Činitel přenosu a činitel odrazu mikropáskového vedení s narušenou zemí včetně kapacitních pahýlů.....	22
28.	Výsledná DP mikropáskového vedení s narušenou zemí.....	23
29.	Výsledný činitel přenosu a činitel odrazu navrhované DP.....	23
30.	Náhradní obvod výsledné .....	23
31.	Výsledný činitel přenosu a činitel odrazu náhradního obvodu navrhované DP.....	24
32a	Vrchní vrstva navrhované DP. Měřítko 1:1 .....	24
32b	Spodní vrstva navrhované DP zrcadlově obrácená k vrstvě vrchní. Měřítko 1:1. ....	24
33a	Vrchní vrstva navrhované DP .....	25
33b	Spodní vrstva navrhované DP .....	25
34.	Naměřené výsledné hodnoty činitele přenosu a činitele odrazu navržené DP .....	25
35.	Porovnání hodnot $s_{11}$ získaných měřením a simulací.....	25
36.	Porovnání hodnot $s_{21}$ získaných měřením a simulací.....	26

## Seznam tabulek

1. Parametry náhradního obvodu mikropásku s porušenou zemí pro různé rozměry širší štěrbiny při fixní šířce užší štěrbiny  $g = 0,2 \text{ mm}$  ..... 12
2. Parametry náhradního obvodu mikropásku s porušenou zemí pro různé šířky užší štěrbiny při fixních rozměrech širší štěrbiny  $a = b = 2,5 \text{ mm}$  ..... 12
3. Parametry náhradního obvodu mikropásku s porušenou zemí pro různé hodnoty  $b$  a  $s$  při fixních rozměrech  $g = 0,3 \text{ mm}$  a  $a = 3 \text{ mm}$ . ..... 21

## Seznam příloh

- DVD Planární filtry s porušenou zemí

## Obsah DVD

- Planární filtry s porušenou zemí.pdf
- Výsledky měření (lpf.xls)
- Šablony pro tvorbu filtru pomocí průsvitného papíru (top.pdf; bott.pdf)
- Namodelovaný filtr DP – složka Ansoft
  - o DP.adsn
  - o složka DP.results
    - .PlanarEM1.asol.semaphore
    - PlanarEM1.asol
    - PlanarEM1.asol\_priv
    - složka PlanarEM1
      - DV8\_S7\_V222.planar
      - složka temp
- Náhradní obvod DP – složka Obvod
  - o Obvod.adsn
  - o složka Obvod.results
    - Circuit1.asol

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Tomíček  
Bytem: Oblá 24, Brno, 634 00  
Narozen/a (datum a místo): 8. ledna 1986 v Brně

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Planární filtry s porušenou zemí

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte



## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2009

.....

Nabyvatel

.....

Autor